

Modelagem Hidrossedimentológica no Semi-Árido Paraibano Utilizando o Modelo Wepp e o Efeito de Escala Sobre os seus Parâmetros

Laércio Leal dos Santos, Vajapeyam Srirangachar Srinivasan

Universidade Federal de Pernambuco, UFPE
laercioeng@yahoo.com.br; vajapeyam@yahoo.com

Ricardo Aragão

Universidade Federal de Sergipe, UFS
ricardoaragao@yahoo.com

Recebido: 19/03/10 - revisado: 19/05/11 - aceito: 21/09/11

RESUMO

A erosão do solo constitui a principal causa do empobrecimento precoce das terras produtivas e seus efeitos são agravados pelo desmatamento, adensamento populacional e práticas agropecuárias, que contribuem em muito para o aumento da produção de sedimentos e o consequente assoreamento de corpos hídricos. Para quantificar esta produção e o volume escoado em parcelas, microbacias e sub-bacias da Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC), foi utilizado o modelo hidrossedimentológico de base física WEPP (Water Erosion Prediction Project). Os parâmetros principais do modelo foram calibrados e os resultados mostram que o modelo é capaz de estimar adequadamente o escoamento superficial das unidades em questão, porém possui pouca precisão para estimar a produção de sedimentos em pequenas bacias. Os parâmetros principais do modelo são sensíveis à escala do experimento. Além disso, para sub-bacias, foi observado que a erosão por impacto de gotas de chuva deixa de ser o processo predominante dando lugar à erosão por fluxo concentrado em pequenos sulcos e nos canais.

Palavras-chave: Erosão, modelo de base física, WEPP, semi-árido.

INTRODUÇÃO

A erosão do solo constitui a principal causa do empobrecimento precoce das terras produtivas. As enxurradas, provenientes das águas que não foram retidas ou infiltradas no solo, transportam partículas de solo em suspensão e nutrientes necessários às plantas (Guerra et al., 1999; Bertoni e Lombardi Neto, 1995). Neste sentido, Bertoni e Lombardi Neto (1995) citam que o Brasil perde, anualmente, pelo menos quinhentos milhões de toneladas de solo por erosão, correspondendo à retirada de uma camada de 15 cm de espessura numa área de 2.800 km². Essa perda de solo influencia diretamente a produtividade das culturas agrícolas, podendo, mesmo em alguns casos, resultar na perda total da capacidade produtiva.

Dentre as atividades humanas responsáveis pela perda de solo podem ser listadas as seguintes: o desmatamento da vegetação nativa, o adensamento populacional aliado à necessidade de maior produção de alimentos, a agricultura irrigada e a pecuária

extensiva e intensiva. Todas estas favorecem a produção de grandes quantidades de sedimentos que, em últimas instâncias, alcançarão os corpos hídricos, comprometendo o seu potencial.

Em regiões áridas e semi-áridas, reconhecidamente sujeitas à escassez hídrica, o conhecimento dos processos hidrossedimentológicos é fundamental para a permanência e sobrevivência do homem no campo. Neste sentido, faz-se necessário o entendimento das respostas hidrológicas de bacias de diferentes escalas sujeitas as chuvas naturais e também a aplicação de ferramentas como os modelos hidrológicos para simular as respostas destas bacias devido às mudanças no clima e no uso da terra.

Visando a coleta de dados para o entendimento das respostas hidrológicas, várias bacias representativas e experimentais foram implantadas na região Nordeste, nas décadas de 1970 e 1980, e mais recentemente, na década de 2000, um esforço conjunto das universidades federais do nordeste (UFC, UFRN, UFPB, UFCG, UFPE, UFRPE, UFAL, UFBA) levou a implantação de outras bacias através dos projetos Implantação de Bacias Hidrográficas no

Semi-Árido - IBESA e Bacias Experimentais e Representativas do Nordeste - BEER (Srinivasan et al., 2004; Santos, 2008), mostrando a necessidade do monitoramento contínuo dos processos hidrossedimentológicos e climatológicos..

Além do monitoramento contínuo, a necessidade de previsão de escoamento superficial e da carga de sedimento devido a um evento ou eventos de chuva em uma dada bacia levou ao desenvolvimento de diversos modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos e dentre estes, destacam-se os modelos de base física, principalmente aqueles que simulam os processos da erosão pela chuva (Beven, 2001; Singh e Woolhiser, 2002; Hrissanthou, 2002; Lopes e Canfield, 2004; Lai, 2009).

Os modelos hidrossedimentológicos de base física, como os modelos SHETRAN (Bathurst et al., 1995), WEPP (Flanagan e Nearing, 1995), WESP, KINEROS2 (Santos, 2008), que consideraram os efeitos das mudanças de uso do solo e as características físicas e climatológicas das bacias, são ferramentas muito úteis para os tomadores de decisão e órgãos gestores, visto que, uma vez parametrizados, os modelos poderão ser utilizados para a previsão de escoamento superficial e a produção de sedimentos devido a um evento de precipitação, o que auxiliaria na gestão de corpos hídricos (Tiscareno-Lopez et al., 1993; Beven, 2001; Singh e Woolhiser, 2002; Aragão et al., 2006; Santos, 2008; Aragão et al., 2009).

Dos modelos acima citados, o WESP e o KINEROS2 têm sido bastante utilizados para a modelagem hidrossedimentológica em pequenas bacias em regiões semi-áridas, como é o caso das bacias experimentais de Sumé e São João do Cariri (Srinivasan et al., 2006; Santos et al., 2009). Contudo, devido às suposições empregadas no desenvolvimento destes modelos, apenas bacias com área máxima de 100 km² podem ser simuladas com confiança, não abrangendo a área das bacias representativas (Al-Qurashi et al. 2008)

Para bacias médias e de grandes dimensões, foram desenvolvidos os modelos SHETRAN e WEPP, dentre outros. Este último, apesar de ser um modelo bastante arrojado e com grande potencial, capaz de simular os processos hidrossedimentológicos em bacias sob diversas condições climáticas e topográficas (Flanagan e Nearing, 1995), ainda não foi testado em bacias do semi-árido nordestino. Uma vez calibrado e validado, o WEPP pode ser utilizado na previsão de aportes hídricos e da carga de sedimentos em mananciais, podendo assim, prever o risco de assoreamento devido a eventos de precipitação.

Para aplicar o modelo WEPP às bacias do nordeste brasileiro, faz-se necessário verificar como o modelo se comporta para bacias de diferentes escalas e a influência da forma de representação dessas bacias no desempenho do modelo.

Tomando-se por base o exposto, o objetivo do presente trabalho é verificar o desempenho do modelo WEPP na modelagem dos processos de geração de vazão e da erosão em várias unidades experimentais na BESJC (duas parcelas de erosão, três microbacias e duas sub-bacias), e o efeito de escala nestas unidades sobre os parâmetros do modelo.

MATERIAL E METODOS

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC)

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) situa-se nas proximidades da cidade de São João do Cariri (7°25' S, 36°30' O), a 220 km de João Pessoa (PB). Esta bacia encontra-se na parte média da bacia do Rio Taperoá (Figura 1), estando inserida na região do nordeste semi-árido conhecida como polígono das secas, e foi instalada pela Universidade de Federal de Campina Grande-UFCG, ano de 1985.

O curso principal desta bacia é o riacho dos Namorados, sendo o seu exutório o Açude Namorados, que abastecia a cidade de São João do Cariri. A bacia ocupa uma área de 14 km². A precipitação média anual na região da BESJC varia entre 400 e 600 mm. A temperatura média anual é de 25 °C. A umidade relativa média anual é igual a 70,6%, de forma que o mês de menor temperatura (junho) marca o período de maior umidade. A BESJC é composta pelas seguintes unidades experimentais: duas parcelas de erosão, três microbacias e quatro sub-bacias.

As parcelas de erosão 1 e 2 (P1 e P2) foram implantadas em julho de 1998 (Figura 1) com o objetivo de coletar de dados de escoamento superficial e erosão do solo, gerados pelas chuvas naturais num plano retangular de 100 m². Cada parcela foi construída no padrão de Wischmeier e Smith, nos mesmos padrões das parcelas da Bacia Experimental de Sumé – BES (Srinivasan et al., 2004).

Cada parcela possui área de 100 m² (4,5 x 22,2 m), declividades iguais a 3,4% (P1) e 3,6% (P2), são mantidas desmatadas e são aradas todas as vezes que se fizer necessário. As parcelas possuem uma saída central ligada a dois tanques de fibrocimento em série, que permitem quantificar o escoamento e os sedimentos produzidos.

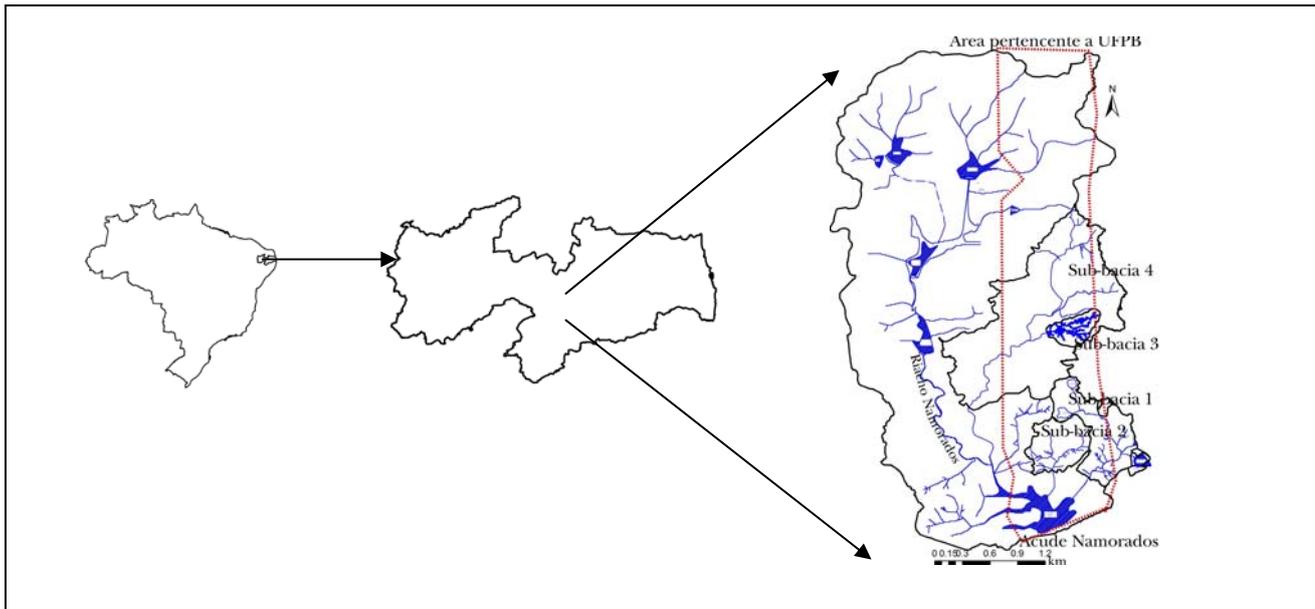


Figura 1 - Localização da Bacia Experimental de São João do Cariri – BESJC, das sub-bacias estudadas, e das parcelas.

Após a instalação das parcelas de erosão, foram instaladas, em sequência, as microbacias 1, 2 e 3 (M1, M2 e M3). No exutório de cada microbacia existe uma fossa de sedimentos pré-dimensionada para coletar cheias em área de até 1 ha, com intensidade de precipitação de 150 mm/h. A M1 possui área de 0,18 ha, declividade média em torno de 7,5% e possui cobertura vegetal remanescente, preservada. A M2 e M3 também possuem cobertura vegetal bastante esparsa, mas preservada, com as respectivas áreas de 0,16 e 1,63 ha, e declividades médias de 9,75 e 6,75%, respectivamente. A M2 está inserida na M3, na condição de bacias aninhadas e permitem analisar o efeito da escala dentro da própria bacia.

Na época de implantação da BESJC, foram instalados vertedores em duas seções de tributários do curso principal da bacia, o riacho dos Namorados, com a finalidade de monitorar os fluxos nestes tributários. Estas seções delimitam sub-bacias (SB1 e SB2) cujas áreas de contribuições são 0,59 km² e 0,32 km², respectivamente (Figura 2).

Para a SB1 foi instalado um vertedor triangular de soleira espessa e na seção que delimita a SB2 foi instalado um vertedor composto de soleira delgada (triangular + retangular). Em cada vertedor foram instalados linígrafos, régua de máxima e régua limimétrica. Posteriormente, através dos projetos IBESA (Srinivasan et al., 2004) e BEER (Santos, 2008) foram instaladas mais duas sub-bacias (SB3 - 0,16 km²; SB4 - 2,0 km²), Figura 1.

Devido às ações antrópicas, grande parte da cobertura vegetal da SB1 foi removida, restando apenas pequenas porções da sua área com a cobertura vegetal. Nas áreas desprotegidas, os processos de erosão através de sulcos e até ravinas estão em evidência.

Por outro lado, a SB2 (Figura 2) possui uma vegetação nativa relativamente conservada e, em relação a SB1, para uma dada precipitação, apresenta uma redução na produção de sedimentos (Aragão, 2006).

O monitoramento climático é efetuado através de duas estações climatológicas (uma automática e uma manual). O monitoramento pluviométrico é efetuado através de cinco pluviômetros automáticos e três pluviógrafos.

DADOS UTILIZADOS

Os dados coletados nas unidades experimentais da BESJC (hidrossedimentológicos e climatológicos) foram processados e utilizados para calibração e validação do modelo WEPP, cujos resultados estão apresentados neste trabalho.

Os eventos de chuva que constam do banco de dados cobrem o período 1987-2006 e como os experimentos foram instalados em épocas diferentes, encontram-se: 179 eventos de chuva para as parcelas 1 e 2; 160 eventos de chuva para a microba-

cia 1; 116 eventos de chuva para as microbacias 2 e 3; 98 eventos de chuva para a sub-bacia 1; 91 eventos de chuva para a sub-bacia 2. Para as sub-bacias, só estão disponíveis dados de produção de sedimentos em 11 eventos. Assim, considerando o grande número de eventos para parcelas microbacias e sub-bacias e os dados a eles associados, serão listados a seguir apenas os eventos de sub-bacias 1 e 2 onde existem dados de produção de sedimentos, apesar de ter um número bem maior de eventos com dados da vazão. O conteúdo relativo a todos os eventos está disponível em Santos (2008).

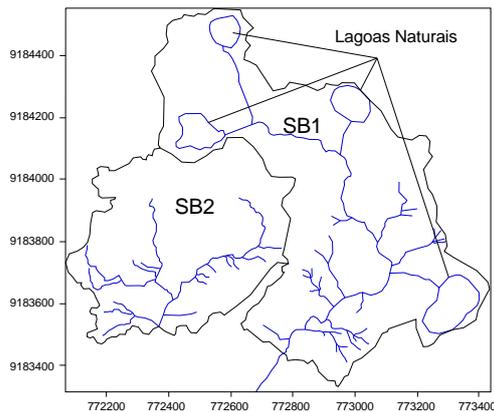


Figura 2 - Rede de drenagem/localização da SB1 e SB2

Diferentemente da metodologia utilizada para coletar dados de produção de sedimentos em parcelas e microbacias, no caso das sub-bacias, apenas foram contabilizados os sedimentos que ficam retidos nas calhas atrás dos vertedores. Isto ocorre porque estes não possuem equipamentos que registram os sedimentos finos em suspensão, que passam juntamente com o escoamento pelo vertedor e não são quantificados. Desta forma, os valores de produção de sedimentos medida nas sub-bacias são efetivamente menores do que os valores reais transportados.

O MODELO WEPP

O modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), proposto por Flanagan e Nearing (1995), é do tipo distribuído e utiliza equações que se baseiam na física dos processos de infiltração, escoamento superficial e erosão. O WEPP simula eventos isolados ou um conjunto de eventos contínuos. A bacia é representada no modelo como uma cascata de planos retangulares e de canais trapezoidais.

No WEPP, o modelo de infiltração de Green-Ampt (1911), Eq.1, é empregado para simular o processo de infiltração durante uma chuva não permanente (Mein e Larson, 1973; Chu, 1978). O solo pode ser constituído de diversas camadas e com diferentes características de cobertura.

$$f_c = K_s t_c + \Psi \theta_d \ln \left[1 + \frac{f_c}{\Psi \theta_d} \right] \quad (1)$$

em que f_c - taxa de infiltração ($m s^{-1}$); K_s - condutividade hidráulica saturada ($mm h^{-1}$); t_c - correção da diferença entre o tempo instantâneo e o tempo atual de empoçamento; θ_d - déficit de umidade do solo ($m. m^{-1}$); Ψ - o potencial mátrico médio (m).

O fluxo real nos planos é um processo tridimensional bastante complexo, mas, em uma escala maior da bacia hidrográfica pode ser visto como um processo unidimensional, expresso pela Eq. 2.

$$q = \alpha h^m \quad (2)$$

onde q - descarga por unidade de largura ($m^2 s^{-1}$); h - é a altura ou profundidade de fluxo (m); α - é o produto do coeficiente de Chezy pela declividade do plano ($C S_0^{0,5}$); m - igual a 1,5.

O fluxo e sua propagação nos planos é descrita pela equação da continuidade,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (3)$$

em que t - tempo (s); x - distância ao longo do sentido da declividade (m); r - excesso de precipitação (m/s).

A equação da continuidade para um canal com entrada lateral de fluxo é descrita como:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Q \quad (4)$$

em que A - área da seção transversal (m^2); q - vazão no canal ($m^3 s^{-1}$); Q - fluxo lateral por unidade de comprimento do canal ($m^2 s^{-1}$).

A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção transversal é dada por:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad (5)$$

em que R - raio hidráulico (m); α - tem o mesmo significado definido anteriormente; m - igual a 1,5;

C- coeficiente de Chezy ($m^{0.5} s^{-1}$) e S_0 - é a declividade.

As equações cinemáticas de fluxo para os planos e canais são resolvidas por uma técnica implícita definida em quatro pontos.

Na modelagem do processo erosivo sobre os planos é empregada a equação da continuidade para quantificação do transporte de sedimentos numa seção de área A (Eq. 6), considerando-se a condição de regime permanente, ao longo de uma encosta, na forma:

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (6)$$

onde G - é a carga de sedimentos ($kg s^{-1} m^{-2}$); x - é a distância ao longo dos sulcos ou canal que drena o fluxo (m); D_i - taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas (entre sulcos) ($kg s^{-1} m^{-2}$); D_r - taxa de liberação de sedimentos nos sulcos ou canais ($kg s^{-1} m^{-2}$). A liberação lateral de sedimentos para os sulcos ou canais é considerada independente de x e é sempre positiva. A erosão nos sulcos é positiva para desprendimento e negativa para deposição de sedimentos.

A taxa de liberação de sedimentos em planos (D_i) pode ser calculada pela Eq. 7, proposta por Flanagan e Nearing (1995).

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad (7)$$

Onde, C_i é o parâmetro que considera o efeito da cobertura vegetal na erosão dos canais, (adimensional); K_i - o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos ($kg s m^4$); I_p - a intensidade de precipitação ($m s^{-1}$); G_e - o parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo contra a erosão, adimensional; S_f - a declividade de linha de atrito ($m m^{-1}$), calculado em função da declividade da superfície e propriedades do fluxo superficial.

A taxa de liberação de sedimentos em sulcos ou pequenos canais (D_r) é calculada para os casos em que a tensão cisalhante do escoamento exceder a tensão cisalhante crítica do solo e quando a carga de sedimentos for menor que a capacidade de transporte do escoamento. O valor de D_r é obtido utilizando-se a Eq. 8, apresentada por Tiscareno Lopez et al. (1994):

$$D_r = C_r K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (8)$$

onde C_r é o fator que considera a cobertura existente no plano, (adimensional); K_r - o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos canais ($s m^{-1}$); τ - a tensão cisalhante atuando nas partículas de solo em decorrência do escoamento ($kg m^{-2} s^{-1}$); τ_c - a tensão cisalhante mínima necessária para a ocorrência da liberação de partículas ($kg m^{-2} s^{-1}$), calculada internamente pelo modelo em função da granulometria; T_c - a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento ($kg m^{-1} s^{-1}$).

Dada à grande diversidade de parâmetros que compõem as equações do modelo, foram efetuados testes de sensibilidade para avaliar aqueles parâmetros que mais influenciam os processos de escoamento superficial e produção de sedimento. Os mais influentes foram: a condutividade hidráulica saturada (K_s), a saturação inicial (S_i), o parâmetro de erodibilidade pelo impacto das gotas de chuva (K_i), o parâmetro de erodibilidade nos canais (K_r) e tensão de resistência ao cisalhamento (τ). A saturação inicial relativa ($S_i = \theta_i / \phi$) é definida como a relação entre a umidade inicial do solo θ_i (m^3/m^3) e a porosidade deste solo, ϕ .

Considerando as dificuldades na estimativa dos citados parâmetros, os mesmos deverão ser calibrados ou adotados para a modelagem. Os demais parâmetros como área, perímetro e características texturais dos solos poderão ser estimados a partir de mapas, e ensaios no campo. Assim, o WEPP requer informações nem sempre disponíveis, mesmo para bacias com certo grau de monitoramento, fato que pode limitar o seu emprego.

DISCRETIZAÇÃO DAS MICROBACIAS E DAS SUB-BACIAS

Para utilização do modelo WEPP é necessário representar a área da bacia em planos retangulares e canais trapezoidais. Desta discretização depende a resposta do modelo para um dado evento de precipitação, sendo esta resposta tão próxima da realidade quanto melhor puder ser representada a bacia (Lopes e Canfield, 2004).

De forma geral, a discretização das micro e sub-bacias foi efetuada com base no mapa da bacia, nas curvas de nível, bem como no modelo digital do terreno, que fornece uma informação mais precisa com relação às áreas que poderão ser consideradas como planos. Assim, foram definidos os canais e os planos que compõem a bacia. A área sob análise foi dividida em elementos planos onde cada elemento

possui características próprias, declividade uniforme, de forma que estes sejam o mais homogêneo possível das condições naturais do relevo, solo e a cobertura vegetal.

No caso das microbacias, o único critério utilizado para definir um plano foi à mudança de declividade, pois foi assumido que cada microbacia possuía uniformidade de solo e vegetação. Posteriormente, foram traçadas as linhas de fluxo, acompanhando a declividade dos planos.

O comprimento na direção das linhas de fluxo define o comprimento do plano. A largura do plano foi determinada como sendo a área do elemento dividida pelo comprimento do plano. O comprimento de cada canal é o mesmo medido no mapa, conservando assim, os comprimentos do sistema de drenagem da bacia. A declividade de cada elemento, seja um plano ou um canal, foi determinada como sendo a diferença de cota ao longo de seu comprimento dividido por esse comprimento.

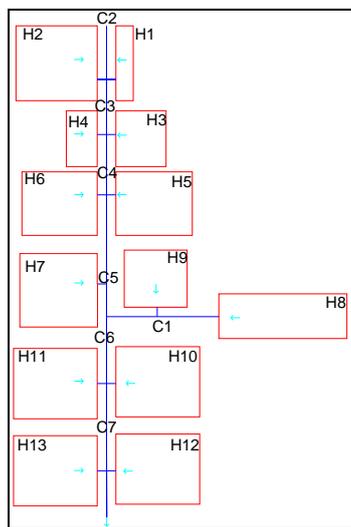


Figura 3 - O esquema de discretização da SB1 em 20 elementos de planos e canais

Com base no exposto, a microbacia M1 foi discretizada em 40 elementos (28 planos e 12 canais), a M2 em 27 elementos (16 planos e 11 canais) e a M3 em 51 elementos (35 planos e 16 canais). Por outro lado, dada às dimensões da sub-bacia SB1 e visando verificar a sua melhor discretização, a mesma foi discretizada com 87 elementos (62 planos e 25 canais) e também com 20 elementos (13 planos e 7 canais). Na Figura 3, é apresentada sequência dos planos (H) e canais (C) para o caso de 20 elementos.

Nas primeiras simulações da SB1, foram levadas em consideração as declividades naturais da região, calculadas através do mapa e da topografia do terreno. Entretanto, observou-se uma produção de sedimentos nos canais muito alta, indicando que a declividade real efetiva era bem menor. Considerando que as declividades citadas acima são as relativas ao plano que margeiam o canal e não necessariamente às declividades dos canais, foi efetuado um ajuste na declividade para 1% em todos os 7 canais (Figura 3) para que a erosão nos canais seja próxima à realidade. Por sua vez, seguindo a metodologia citada, a SB2 foi discretizada em 54 elementos (37 planos e 17 canais).

PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO

Essa etapa se destina à determinação de valores dos parâmetros do modelo que podem ser medidos nos ensaios laboratoriais e de experimentos na própria bacia, ou pela calibração, conforme descrito por Paiva (2008) e Santos (2008).

Foram utilizados os dados de lâmina e produção de sedimentos de P1 e P2 para realizar diversas simulações visando determinar o melhor valor de condutividade hidráulica saturada (K_s) representativa da bacia. Na ausência das medições espaciais de K_s na bacia experimental, o valor de K_s que permitiu simular o maior número de eventos aproximando ao valor do escoamento observado, foi adotado como representativo e foi mantido fixo em todos os elementos planos das unidades experimentais da BESJC parâmetros.

Como o modelo WEPP não considera o padrão da distribuição de água no solo, nem mesmo sua redistribuição, faz-se necessário fornecer o valor da umidade inicial do solo (S_i) antes da simulação de cada evento. Porém, dada a dificuldade na sua determinação, o valor de S_i foi obtido evento a evento, via tentativa e erro, procurando ajustá-lo até que a lâmina simulada fosse igual ou muito próximo ao valor observado.

O parâmetro K_i , que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos, foi determinada num processo de calibração utilizando os dados das parcelas. Este parâmetro exerce uma grande influência sobre a erosão que acontece pelo impacto das gotas de chuva. O parâmetro foi calibrado evento a evento ajustando seu valor até que a produção de sedimentos simulada fosse igual ou próximo ao valor observado. O valor médio obtido nos diversos eventos utilizados para calibração, foi adotado como o valor deste parâmetro.

O emprego dos valores médios de S_i e K_i das parcelas nos planos das microbacias permitiu a calibração do parâmetro K_r . Este parâmetro também foi calibrado, evento a evento, via tentativa e erro, procurando minimizar a diferença entre o valor da produção de sedimento simulada e o valor observado em cada evento. Posteriormente, seu valor médio foi empregado nos canais das microbacias e também nas sub-bacias conforme o caso.

Para as sub-bacias foram testados duas alternativas quanto às camadas e características do solo: a) uma única camada; b) duas camadas. Foi verificado que, somente quando foi considerado o solo com duas camadas (Tabela 1), era possível calibrar os parâmetros desejados para um maior número de eventos observados.

Tabela 1 - Características do arquivo de solo (2 camadas)

Horizonte	Profundidade (mm)	Arcia (%)	Argila (%)	Material orgânico (%)	CEC* (meq/100g)	Rocha (%)
A	60,00	50,00	10,00	6,50	5,00	5,00
B	500,00	20,00	10,00	2,00	5,00	7,00

*Capacidade de Troca de Cátions

Na discretização das sub-bacias, os canais foram considerados com leito de cascalhos, enquanto que nas microbacias foram considerados com o leito arenoso, conforme as observações no campo. A tensão de resistência ao cisalhamento (τ) do material do leito dos planos e dos canais foi calibrada com dados de parcelas e microbacias, respectivamente, através de tentativas. De uma forma geral, o processo de calibração passou pelos seguintes estágios: definição dos parâmetros K_s e τ (a partir de várias simulações e testes de sensibilidade com dados de parcela) e calibração de S_i para cada evento. Fixados estes valores, K_i e K_r foram determinados para cada evento, e seus valores médios foram utilizados nos planos das microbacias e sub-bacias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O emprego do processo de calibração dos parâmetros principais do modelo, utilizando dados de parcela, levou a valores de lâmina calculada muito próximos dos observados, tanto para P1 (R^2 de 0,999) quanto para P2 (R^2 de 0,933). Esse resultado indica que o modelo consegue, na maioria dos casos, representar adequadamente o escoamento superficial para elementos desta ordem, como foi

constatado por Tiscareno-Lopez et al. (1993) e Flanagan e Nearing (1995) para bacias pequenas em regiões semiáridas.

Ao empregar o mesmo processo de calibração dos parâmetros S_i e K_r para M1, M2, M3, os resultados para a lâmina escoada se mostraram animadores, mas os valores simulados de erosão foram muito maiores do que os observados, particularmente nos eventos com baixo valor de erosão observada. Uma razão para este fato é que o modelo WEPP contabiliza como valor mínimo de produção de sedimentos 100 kg/ha, o que, no caso das unidades de BESJC, é muito superior ao valor observado (Tabelas 2 e 3), mesmo para SB1 e SB2.

Para os dados em questão, e considerando as suposições implícitas nas equações de erosão do WEPP, foi verificado que o mesmo gera elevadas produções de sedimento em canais quando as declividades dos canais são obtidas pela diferença das cotas superficiais no mapa topográfico. Mesmo assim, os valores de R^2 entre o resultados calculados e observados foram os seguintes: 0,853 para M1, 0,272 para M2 e 0,919 para M3. Observa-se que como os valores de produção de sedimentos observados em M2 são bem menores do que os de M3 em todos os eventos, a erosão mínima contabilizada pelo modelo sendo alta resultou, num valor muito baixo de R^2 .

Deve-se considerar também o fato que, a priori, o modelo WEPP foi desenvolvido para ser aplicado a grandes bacias com a produção considerável dos sedimentos. Desta forma, nas regiões onde a produção de sedimentos não é muito alta, os resultados não serão satisfatórios sem que haja alguns ajustes no modelo.

Os valores de condutividade hidráulica saturada (K_s) encontrados para as duas parcelas foram de 2 mm/h. Para as microbacias, esse valor foi utilizado com êxito no processo de calibração. Entretanto, para as sub-bacias, o valor encontrado através de várias tentativas foi de 4 mm/h refletindo, provavelmente, o efeito de escala sobre o escoamento superficial. Quando as simulações foram realizadas nas microbacias considerando K_s de 4 mm/h as lâminas escoadas ficaram bem inferiores aos valores observados, confirmando valores diferentes deste parâmetro para microbacias e sub-bacias.

Após fixar o valor de K_s nas sub-bacias, foi possível calibrar o parâmetro de saturação inicial na SB1 e SB2, que variou no intervalo de 14,28% e 95,00%. (Tabelas 4). A maioria dos eventos ocorreu no período chuvoso (janeiro a junho) do intervalo 1987 a 2006, e para estes, o valor do parâmetro S_i calibrado foi igual ou superior a 50%, nas duas sub-bacias. Essa situação também foi observada na Cali-

Tabela 2 – Calibração de Si e simulação da produção de sedimentos para a discretização 1 da sub-bacia 1

Cheia	$K_i = 10^4 \text{ kg s m}^{-4} - K_e = 0,0001 \text{ s m}^{-1} - K_s = 4,0 \text{ mm h}^{-1} - \tau = 20 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} - 2 \text{ camadas de solo}$									
	Data	Chuva	Lo (mm)	Eo (t/ha)	Eo (kg/ha)	Lc (mm)	Si	Lc/Lo	E (ton/ha)	E (kg/ha)
41	25/1/2004	64,8	12,515	0,02182	21,82	24,275	14,28	1,94	0,3	300
42	31/1/2004	12,1	1,138	0,00061	0,61	1,144	92,5	1,006	0	0
43	27/2/2004	17,0	1,746	0,00352	3,52	1,792	86,5	1,026	0	0
44	15/7/2004	45,7	4,471	0,00061	0,61	4,6	23,0	1,029	0	0
45	17/2/2005	9,6	0,105	0,00116	1,16	0,058	95,0	0,553	0	0
46	25/3/2005	22,6	0,426	0,00303	3,03	0,461	25,0	1,083	0	0
47	29/3/2005	36,0	3,684	0,00521	5,21	6,103	14,28	1,657	0,1	100
48	28/4/2005	38,4	6,551	0,01697	16,97	6,854	14,28	1,046	0,1	100
49	24/4/2006	9,3	0,398	0,00559	5,59	0,131	95,0	0,329	0	0
50	27/4/2006	12,1	3,304	0,004	4,00	1,593	95,0	0,482	0	0
51	13/5/2006	15,8	0,894	0,01222	12,22	0,803	90,1	0,898	0	0
52	21/6/2006	32,8	4,221	0,02643	26,43	4,01	18,0	0,95	0	0

Tabela 3 – Calibração de Si e simulação da produção de sedimentos para a discretização 2 (20 elementos) da sub-bacia 1

Cheia	$K_i = 10^4 \text{ kg s m}^{-4} - K_e = 0,0001 \text{ s m}^{-1} - K_s = 4,0 \text{ mm h}^{-1} - \tau = 20 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} - 2 \text{ camadas de solo}$							Declividade normal		Declividade alterada		Variação (%)	
	Data	Chuva	Lo (mm)	Eo (t/ha)	Eo (kg/ha)	Lc (mm)	Si	Lc/Lo	E (ton/ha)	E (kg/ha)	E (ton/ha)		E (kg/ha)
41	25/1/2004	64,8	12,515	0,02182	21,82	23,681	14,28	1,892	0,4	400	0,2	200	-50
42	31/1/2004	12,1	1,138	0,00061	0,61	1,093	95,0	0,961	0	0	0	0	xxx
43	27/2/2004	17	1,746	0,00352	3,52	1,971	92,0	1,129	0	0	0	0	xxx
44	15/7/2004	45,7	4,471	0,00061	0,61	4,966	26,0	1,111	0,2	200	0	0	-100
45	17/2/2005	9,6	0,105	0,00116	1,16	0	95,0	0,0	0	0	0	0	xxx
46	25/3/2005	22,6	0,426	0,00303	3,03	0,473	54,0	1,111	0	0	0	0	xxx
47	29/3/2005	36	3,684	0,00521	5,21	4,692	14,28	1,274	0,1	100	0	0	-100
48	28/4/2005	38,4	6,551	0,01697	16,97	6,656	28,0	1,016	0,3	300	0,1	100	-66,667
49	24/4/2006	9,3	0,398	0,00559	5,59	0,0	95,0	0,0	0	0	0	0	xxx
50	27/4/2006	12,1	3,304	0,004	4,00	1,012	95,0	0,306	0,1	100	0	0	-100
51	13/5/2006	15,8	0,894	0,01222	12,22	0,929	92,0	1,039	0	0	0	0	xxx
52	21/6/2006	32,8	4,221	0,02643	26,43	4,369	35,0	1,035	0,2	200	0	0	-100

K_i - credibilidade do solo nos planos; K_r - erodibilidade do solo nos canais; τ - tensão cisalhante devido ao escoamento; L_o - lâmina observada; E_o - erosão observada; L_c - lâmina calculada; S_i - saturação inicial; Declividade alterada=1%

bração com dados de parcelas e microbacias. A ocorrência do escoamento, no caso de chuvas de baixa magnitude, indica que o solo deve estar bastante úmido no início da chuva para que a precipitação possa superar a infiltração e gerar escoamento superficial.

Os valores médios de S_p , para parcelas, microbacias e sub-bacias, encontradas foram os seguintes:

Tabela 4 – valores médios em dos parâmetro S_i (%)

Unidade	P1	P2	M1	M2	M3	SB1(Disc1)	SB1(Disc2)	SB2
S_i	76,20	78,48	43,10	37,42	37,17	52,81	59,23	61,27

Estes resultados demonstram, além dos possíveis efeitos da escala, que o modelo também é sensível à forma de discretização das sub-bacias, uma vez que, para os mesmos eventos de precipitação, o aumento no número de elementos que compõe a bacia produz mudanças no parâmetro S_p , a saturação inicial. A calibração do parâmetro de tensão de

cisalhamento, utilizando dados das parcelas, levou a um valor médio de 8 Pa. Nas microbacias (1, 2, 3), contudo, o valor médio de tensão foi de 10 Pa. Por outro lado, nas sub-bacias o valor de tensão calibrado, foi de 20 Pa, o valor máximo permitido pelo modelo. Assim, nota-se que este parâmetro também sofre o efeito de escala, visto que o seu valor médio aumenta com a área da unidade experimental. Entretanto não foi possível efetuar estudos relacionando estes parâmetros com características mensuráveis da bacia de forma a permitir a sua estimativa direta.

Nas simulações nas sub-bacias foi observada a elevada produção de sedimentos, principalmente nos canais, mesmo quando o valor do parâmetro de erosão em planos, K_p , foi reduzido ao valor limite mínimo (10^4 kg s m^{-4}). Desta forma, ficou evidenciado que a erosão pelo fluxo concentrado é o processo físico dominante sobre a produção de sedimentos nas sub-bacias e, portanto, a declividade dos canais deve ser levantada no campo. A obtenção da mesma pelo mapa topográfico levaria a grandes erros na simulação da produção de sedimentos.

Assim, visando reduzir esta produção de sedimento de forma a torná-la o mais compatível com os valores observados, foi empregado nas simulações o valor mínimo permitido pelo modelo para o parâmetro K_r , que é 0,0001 s/m e a declividade dos canais reduzido a 1%. Isto levou a produção simulada de sedimentos aos valores bem menores, mas ainda maiores do que medidos nos eventos, que por sinal, eram menores do que reais, conforme explicado anteriormente. A utilização da segunda discretização de SB1 (20 elementos) com a declividade dos canais igual a 1% acarretou uma redução na produção de sedimentos entre 33% a 100%. Assim, a simulação da produção de sedimentos pelo modelo WEPP é muito mais sensível à declividade dos canais do que nos outros modelos como WESP e KINEROS.

Considerando o reduzido número de eventos em que foram coletados dados de produção de sedimentos, ainda não é possível o emprego de análise estatística a estes dados. Entretanto, os resultados mostram que o modelo consegue simular todos os processos envolvidos e, à medida que um maior número de eventos for utilizado para calibração/validação dos parâmetros, as simulações tendem a melhorar.

EFEITO DE ESCALA SOBRE OS PARÂMETROS DO MODELO WEPP

No presente estudo foi observado que o efeito da escala exerce algum tipo da influência sobre os parâmetros S_i , K_s , K_i e K_r , uma vez que, quando a área da bacia ou do elemento em questão variou, este parâmetro calibrado também variou, mesmo não apresentando uma tendência clara.

Comparando os valores médios de K_s relativos às parcelas, microbacias e sub-bacias (Figura 4), foi observado que existe uma tendência do valor de K_s crescer com o aumento da área da bacia. Contudo, entre parcelas e microbacias K_s encontra-se no mesmo patamar, o que poderá ser atribuído ao fato dessas unidades possuírem uma possível homogeneidade nas características destes elementos. Entretanto, em se tratando de parcelas e sub-bacias, a variação do K_s médio foi considerável, o que pode ser atribuída à grande heterogeneidade existente nas sub-bacias.

Em relação ao parâmetro de saturação inicial médio do solo (S_i), houve uma variação entre todas as unidades (Figura 5), porém não houve uma variação consistente com o aumento da área. As

parcelas de 100 m² apresentaram o maior valor médio enquanto, as microbacias o menor valor médio. É interessante observar que as diversas unidades da mesma escala apresentam praticamente o mesmo valor da saturação inicial, indicando a consistência dos valores destes parâmetros.

Em relação ao parâmetro que representa a erosão pelo impacto das gotas de chuva sobre os planos, K_i , os valores encontrados foram de $1,0 \times 10^4$ kg s m⁻⁴ para as microbacias e sub-bacias e $1,685 \times 10^6$ kg s m⁻⁴ para as parcelas. Nas parcelas, esse parâmetro influencia ativamente na modelagem do processo erosivo, pois as mesmas não apresentam processos de erosão pelo fluxo concentrado. Esta situação é bem diferente nas microbacias e sub-bacias, onde esse parâmetro deixa de ser influente, uma vez que a erosão nestas unidades está vinculada, principalmente, ao processo de fluxo concentrado nos canais e nos pequenos sulcos que se formam sobre os planos das microbacias e sub-bacias. Resultado semelhante foi observado por Srinivasan et al. (2006) com o modelo KINEROS2 que possui parâmetros similares aos acima citados.

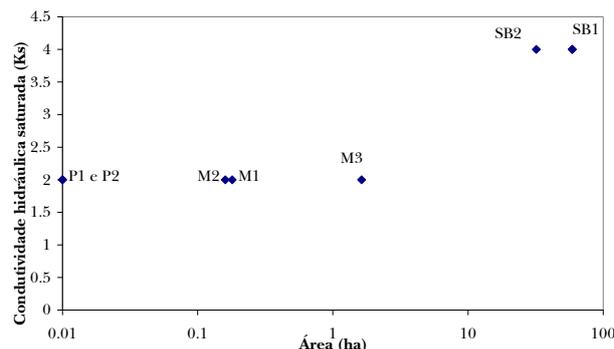


Figura 4 - Variação do parâmetro K_s calibrado do modelo WEPP com as áreas das unidades analisadas.

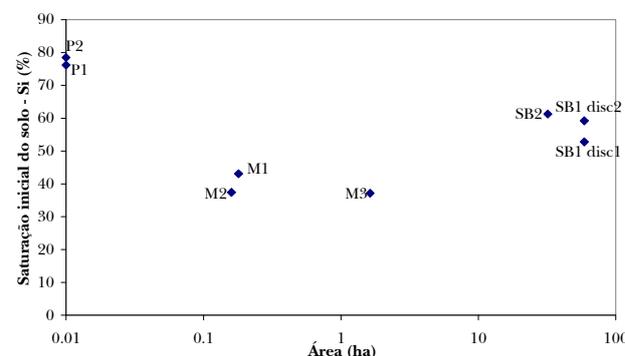


Figura 5 - Variação do parâmetro S_i calibrado do modelo WEPP com as áreas das unidades analisadas.

CONCLUSÕES

O modelo WEPP simula os processos hidrossedimentológicos adequadamente, representando os principais processos físicos envolvidos. O modelo parece simular os processos melhor em bacias com alta produção de sedimentos, mas, em pequenas bacias onde o solo é relativamente resistente, o modelo consegue simular bem o escoamento superficial, mas superestima a produção de sedimentos. No presente estudo, o modelo simulou bem o escoamento nas microbacias e sub-bacias, porém super estimou a produção de sedimentos. Uma das razões para superestimação de sedimentos é a alta sensibilidade do modelo para as declividades dos canais, que precisam ser levantadas no campo cuidadosamente.

Os parâmetros principais do modelo sofrem a influência da escala da bacia, porém esta tendência ainda precisa ser melhor definida para outras áreas em outras regiões. A grande vantagem potencial do modelo WEPP é seu grande acervo de banco de dados interno e a possibilidade de parametrizar o modelo para bacias sem dados hidrossedimentológicos para as estimativas preliminares do escoamento e erosão em eventos isolados ou sequenciados.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq e a CAPES pelos incentivos proporcionados através dos programas de auxílio e de bolsas para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, R.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S.; SANTOS, L.L.; PAIVA, F.M.L. Parametrização do modelo KINEROS2 Em uma bacia sergipana. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. 2009.
- ARAGÃO, R. Análise da Influência Antrópica na Produção de Escoamento Superficial e Sedimentos em Bacias Hidrográficas do Cariri Paraibano Através da Modelização dos Processos Físicos e do Emprego de SIG. Relatório Técnico, Edital 002/03 – FAPESQ-PB/MCT/CNPq, CNPq – Processo N°. 35.0599/2004-1. 2006.
- BATHURST, J.C., WICKS, J.M., e O'CONNELL, P.E. The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System. In: V.P.Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, United States. 1995.
- BEVEN, K. Rainfall-Runoff Modelling - The Primer. John Wiley e Sons Ltd. West Sussex, England. 360p. 2001
- BERTONI, J.; LOMBARDI Neto, F. Conservação do solo. 4. ed., Ícone, 355p 1999.
- CHU, S.T. Infiltration during an unsteady rain. Water Resources Research 14(3):461-466. 1978
- FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana. 1995
- GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M.; Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340 p. 1999.
- GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. Journal Agr. Sci., 4(1): 1-24. Apud Mein e Larson (1973). 1911
- HRISSANTHOU, V. Comparative application of two erosion models to a basin. Hydrol. Sci. J., 47:279-292, 2002.
- LAI, Y. G. Watershed Runoff and Erosion Modeling with a Hybrid Mesh Model. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 14, No. 1, January/February, pp. 15-26, 2009
- LOPES, V.L.; CANFIELD, H.E. "Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling". Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 40(2): 311-319. 2004.
- MEIN, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research 9 (2):384-394. 1973.
- SANTOS, L. L.; SRINIVASAN, V.S.; ARAGÃO. R. Parametrização do modelo WEPP em duas sub-bacias do semi-árido paraibano. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. 2009.
- SANTOS, L. L. Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três modelos em Pequenas Sub-bacias na Região Semi-Árida Paraibana. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos. 2008.
- SRINIVASAN, V. S. ARAGÃO, R., MORAES, H. A.; SANTOS, L. L. Applicability of the Model KINEROS2 for the Semiarid Basins of the North-East of Brazil. In: Proceedings of 15TH Congress of Asia and Pacific Division of the IAHS and International Symposium on Maritime Hydraulics, Chennai, India: IAHS, v. 1. p.1. 2006.

- SRINIVASAN, V.S. et al. Bacia Experimental de São João do Cariri-PB. In: Righetto, A.M. (Org.), Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido, Cap. 4, FINEP/FUNPEC/CNPq/CTBRASIL. 93-126. 2004.
- SINGH, V.P., WOOLHISER, D. A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 4, July 1, 2002.
- TISCARENO-LOPEZ, M.; A Bayesian-Monte Carlos Approach to Assess Uncertainties in Process-Based, Continuous Simulation Models. Ph.D. Dissertation, University of Arizona, Tucson, AZ. 1994.
- TISCARENO-LOPEZ, M.; LOPES, V.L.; STONE, J.J.; LANE, L.J. Sensitivity Analysis of the WEPP Watershed Model for rangeland applications I: Hillslope processes. *ASAE*. Vol. 36(6). 1659-1672p. 1993.

Hidrosedimentological Modeling in a Semiarid Region of Paraíba State –Brazil Using the Wepp Model and the Scale Effect on Its Parameters

ABSTRACT

Soil erosion is the main cause of nutrient and productivity losses in the soil cover. This effect is further enhanced by land clearing, increased land occupation and inadequate agricultural practices which increase land erosion and consequent sedimentation of water bodies. In order to estimate the production of sediments by erosion in plots, micro-basins and sub-basins of the Experimental Station of São João de Cariri (BESJC), the physically based model WEPP (Water Erosion Prediction Project) was utilized. The most important parameters were calibrated and the results show that while the model can provide a good estimate of runoff, the accuracy of the erosion estimation component is poor, mainly when estimating low level production of sediments. It was also seen that the parameters varied with the area of the unit, thereby indicating the scale effect. It was also found that in the sub-basins the main source of sediment production is erosion by concentrated flow in rills and channels, not erosion by rain drop impact.

Key-words: *Erosion, Physical base model, WEPP, semiarid.*